

DOI: 10.5846/stxb201909282040

叶国辉, 楚彬, 胡桂馨, 张飞宇, 华铄泽, 周富斐, 花立民. 高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物多样性对环境因子的响应. 生态学报, 2021, 41(2): 792-802.

Ye G H, Chu B, Hu G X, Zhang F Y, Hua X Z, Zhou F F, Hua L M. Response of soil macrofauna diversity to environmental factors under plateau zokor (*Myospalax baileyi*) disturbance in alpine meadow ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 792-802.

## 高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物多样性对环境因子的响应

叶国辉, 楚彬, 胡桂馨, 张飞宇, 华铄泽, 周富斐, 花立民\*

甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070

**摘要:**为研究高寒草甸大型土壤动物群落组成和分布对环境因子的响应, 选取祁连山东段的甘肃省天祝县高原鼯鼠典型分布区域, 以鼠丘密度代表干扰强度设置 4 个干扰区。调查各干扰区植被群落特征、土壤理化性质、大型土壤动物类群组成及其数量, 采用约束性排序方法分析环境因子对大型土壤动物类群组成和分布的影响。结果表明: 高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物优势类群为瓦娄蜗牛科、象甲科和短角亚目幼虫; 极重度干扰区大型土壤动物类群的丰度、丰富度、Shannon 指数显著高于重度干扰区 ( $P < 0.05$ ); 多元回归分析表明大型土壤动物类群丰度、丰富度和 Shannon 指数与土壤温度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 丰富度与土壤含水量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 丰度与土壤紧实度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 丰富度和 Shannon 指数与植物 Shannon 指数呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ); 冗余分析和偏冗余分析表明, 土壤温度、紧实度和含水量是影响高寒草甸大型土壤动物类群组成和分布的主要环境因子。

**关键词:**高原鼯鼠; 大型土壤动物; 土壤因子; 冗余分析

## Response of soil macrofauna diversity to environmental factors under plateau zokor (*Myospalax baileyi*) disturbance in alpine meadow ecosystem

YE Guohui, CHU Bing, HU Guixin, ZHANG Feiyu, HUA Xianze, ZHOU Fufei, HUA Limin\*

College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Soil fauna are important components in terrestrial ecosystems. Because soil animals are very sensitive to environment changes, they are useful indicators for soil assessing ecosystem health. In alpine meadow ecosystems, soil animals, especially invertebrates and soil dwelling microfauna are disturbed by herbivorous mammals because of their grazing, trampling, and nutrient transfer through feces and urine etc. Here, we report a study showing the effect of plateau zokor disturbance on soil fauna composition and distribution in alpine meadow in Tianzhu County in the eastern Qilian Mountain in China. We used the zokor mound density to represent its disturbance intensity. We selected four paddocks with different zokor's mounds densities to investigate the soil fauna species and habitat characteristics, including soil physical and chemical properties and plant species diversity and biomass. Multiple Regression analysis was used to determine the relationship between the soil fauna diversity and habitat characteristics. Redundancy analysis was used to assess the influence of environmental factors on soil fauna species distribution and composition. The results show that the Valloniidae, Curculionidae and Brachycera larva were the dominant soil fauna group in the study area. The abundance and richness and Shannon index of the soil animal community in the paddock with extreme disturbance intensity were significantly higher than

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504803, 2016YFC0501902)

收稿日期: 2019-09-28; 网络出版日期: 2020-11-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hualm@gsau.edu.cn

that in the severe disturbance intensity ( $P < 0.05$ ). The soil fauna abundance, richness and Shannon diversity index had a significant negative correlation with soil temperature. Species richness had significantly negative correlation with soil moisture, the species abundance had significantly negative correlation with soil compaction. The Shannon diversity index for plants had significantly negative correlation with richness and Shannon diversity index of soil fauna. Furthermore, the spatial distribution of soil fauna community was significantly affected by soil temperature, compaction and soil moisture at all sites.

**Key Words:** *Myospalax baileyi*; soil fauna; soil fact; Redundancy analysis

生物多样性和生态系统功能之间的关系成为生态学和环境科学的核心问题<sup>[1]</sup>。土壤动物作为陆地生物多样性关键组成部分,通过碎屑食物网参与凋落物分解与营养供应等生态学过程,对维持陆地生态系统结构和功能发挥重要作用<sup>[2-3]</sup>。近年来,众多生态学家越来越青睐土壤动物对环境变化的指示作用<sup>[4-5]</sup>。研究表明,土壤动物类群多样性与植物群落特征和土壤理化性质等环境因子紧密相关<sup>[6-7]</sup>。由于植物群落构成的微生境为土壤动物提供适宜的栖息环境,且植物群落特征的改变会影响土壤动物食物资源。而土壤作为地下生物生命承载体,其结构和营养变化对土壤动物多样性可以产生直接影响。

高寒草地作为青藏高原重要生态屏障,对维护我国内陆生态系统平衡和支撑畜牧业生产具有重要意义<sup>[8]</sup>。近年来,受全球气候变暖、超载过牧以及鼠虫害等生物或非生物干扰影响,高寒草甸退化日趋严重,土-草-畜三位一体的草地生态系统衰退日益尖锐<sup>[9-10]</sup>。高原鼯鼠作为青藏高原优势地下啮齿动物,也是引起高寒草甸退化的重要生物干扰源,其采食造丘活动形成的微生境斑块,明显改变了原有植被群落结构、土壤水热条件以及营养状况<sup>[11-12]</sup>。鉴于植被-土壤环境因子与大型土壤动物多样性和分布密切相关。因此,高原鼯鼠造成的局域生境改变是否会引起大型土壤动物多样性以及分布对环境差异响应。基于此,本研究依据高原鼯鼠鼠丘密度设置四个不同强度干扰区,通过调查各干扰区大型土壤动物群落特征、植被和土壤状况,分析高寒草甸大型土壤动物群落多样性与环境因子之间的关系,探讨地下生物对地上生态系统格局和功能影响反馈机制,进而评价地下啮齿动物干扰下大型土壤动物多样性变化对高寒草地生态系统的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

试验地设于甘肃省武威市天祝藏族自治县抓喜秀龙乡,该区位于东祁连山金强河谷地,地理坐标 N 37° 12', E 102° 46', 海拔 2937 m, 地形受马牙雪山和雷公山影响。年均温 -0.1℃, 1 月平均温度 -18.3℃, 7 月平均温度 12.7℃, >0℃ 年积温 1380℃; 年均蒸发量 1592 mm, 年均降水量 416 mm, 多为地形雨, 集中于 7, 8 和 9 月, 无绝对无霜期。植物生长期 120—140 d。土壤以亚高山草甸土、亚高山黑钙土为主<sup>[13]</sup>。植被类型为高寒草甸, 以莎草科、禾本科植物为主, 主要植物有矮嵩草 (*Kobresia humilis*)、线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、平车前 (*Plantago depressa*)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*)、秦艽 (*Gentiana macrophylla*)、扁蓿豆 (*Medicago ruthenica*)。高原鼯鼠为该地区绝对优势鼠种。

### 1.2 试验设计

选取面积为 7 hm<sup>2</sup> 且放牧强度一致的冬季牧场。于 2018 年 6 月下旬, 依据高原鼯鼠造丘数量, 将研究区划分为轻度 (LD, 128 个/hm<sup>2</sup>)、中度 (MD, 360 个/hm<sup>2</sup>)、重度 (HD, 697 个/hm<sup>2</sup>) 和极重度 (ED, 982 个/hm<sup>2</sup>) 干扰区。各干扰区面积为 50 m × 50 m, 干扰区间隔 50 m 以上。在各干扰区鼠丘间草地设置 9 个大型土壤动物采样点。样方大小 0.5 m × 0.5 m, 深度 15 cm, 共计 36 个样方。土壤理化性状的测定取样均设置在大型土壤动物调查样方附近。

### 1.3 调查取样

采用手捡法挑出大型土壤动物, 用 75% 乙醇溶液保存, 带回室内鉴定。大型土壤动物鉴定参考《中国土

壤动物检索图鉴》<sup>[14]</sup>,多数统计到科;部分大型土壤动物幼虫统计到目,并统计个体数量。根据土壤动物调查样点记录样方内植物各物种数目和种类,统计完成后按种剪掉地上部分装入信封袋带回实验室,烘箱 75 °C 烘干至恒重称取地上各植物干重。鉴于调查区域高寒草甸以莎草类植物占据优势,为便于统计分析将地上植物生物量划分莎草和杂类草功能群生物量;调查土壤动物样方附近每种植物自然高度;各区随机抛掷样圆 30 次调查频度。

#### 1.4 土壤理化性质测定

土壤水分和温度使用土壤温湿度仪(顺科达土壤水分速测仪 TR-8 型)测定,土壤紧实度使用土壤紧实度仪(Field scout SC900)测定,在各样点重复 3 次。土壤样品经浓硫酸和混合催化剂(硫酸钠-硫酸铜)消解后,土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定;土壤全磷采用钼锑抗显色法测定;全钾用火焰光度计测定;土壤有机质采用重铬酸钾氧化-稀释热法测定;土壤 pH 采用 pHSJ-4A 型 pH 计土水比 1(g):2.5(mL)测定<sup>[15]</sup>。高原鼯鼠干扰区植物物种多样性、生物量和土壤理化性质的基本情况存在一定差异(表 1)。

表 1 高原鼯鼠干扰下各干扰区基本概况

Table 1 Characteristics of plant communities and soil properties in the plots under different disturbance of plateau zokor

干扰等级 Disturbance degree	植物丰富度 Richness index	植物均匀度 Evenness index	香农指数 Shannon diversity index	群落高度 Plant community height/cm	莎草目生物量 Sedge's above-ground biomass/(g/m <sup>2</sup> )	杂类草生物量 Forb's above-ground biomass/(g/m <sup>2</sup> )	土壤有机质 Soil organic matter/(g/kg)
LD	15.4±0.50a	0.94±0.01b	3.40±0.11a	8.26±0.81c	187.5±30.27a	158.7±13.16ab	97.5±3.84a
MD	14.8±0.56a	0.95±0.01a	3.42±0.12a	10.9±0.61a	161.9±17.75a	131.3±10.85b	95.5±5.09a
HD	16.1±0.48a	0.94±0.01b	3.37±0.07b	10.0±0.91b	161.3±12.41a	189.9±18.95a	99.7±3.19a
ED	15.1±0.51a	0.94±0.01b	3.27±0.12c	8.71±0.64c	158.7±26.43a	152.2±17.69ab	98.5±5.49a
干扰等级 Disturbance degree	土壤全氮 Soil total N/(g/kg)	土壤全磷 Soil total P/(g/kg)	土壤全钾 Soil total K/(g/kg)	土壤 pH Soil pH	土壤温度 Soil temperature/°C	土壤湿度 Soil moisture content/%	土壤紧实度 Soil compaction/Kpa
LD	5.24±0.10b	0.79±0.02b	7.82±0.05a	7.22±0.14c	19.06±0.36a	32.08±0.57a	1678±153.6ab
MD	4.83±0.35b	0.81±0.02b	7.86±0.06a	7.08±0.10a	18.04±0.28b	32.70±0.95a	1519±167.8b
HD	6.30±0.10a	0.81±0.07b	7.84±0.07a	7.18±0.09b	19.21±0.29a	31.87±1.05a	1956± 95.6a
ED	4.54±0.27b	0.91±0.02a	7.72±0.04a	7.46±0.12c	16.32±0.23c	29.75±1.21a	1454±119.2b

同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ );LD:轻度干扰,Lightly disturbance;MD:中度干扰,Moderately disturbance;HD:重度干扰,Heavily disturbance;ED:极重度干扰,Extremely disturbance

#### 1.5 数据分析

##### 1.5.1 多样性指数

丰富度指数  $R = S$  ( $S$  为样方中出现的类群数);平均密度表示丰度(Abundance);Shannon 多样性指数( $H'$ )和 Pielou 均匀度指数( $J$ )表示大型土壤动物多样性和均匀度<sup>[6]</sup>。

##### 1.5.2 多元排序及相关性分析

采用 Canoco4.5 软件分析大型土壤动物的类群和数量与环境变量关系。分析过程中对物种数据进行  $\log(x+1)$  转换,排序之前用物种数据做去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)<sup>[16]</sup>。为评估环境因子对大型土壤动物数量的影响,分别计算各环境因子的总效应和净效应<sup>[17]</sup>。采用 CanocoDraw 绘制排序图。

利用 R3.5.2 中的 corplot 包进行土壤动物类群多样性指数与环境因子间相关性分析并检验其相关性水平,之后绘图。

以上数据用 Excel 2013 进行初步处理,用 SPSS 19.0 中的 LSD 法进行数据的多重比较( $\alpha = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物群落组成

本试验共捕获大型土壤动物 1172 只,隶属于 2 门 4 纲 9 目 28 科。优势类群有瓦娄蜗牛科(占捕获总量 15.44%)、象甲科(占捕获总量 13.74%)和短角亚目幼虫(占捕获总量 19.71%)。常见类群主要有步甲科、隐翅甲科、埋葬甲科、拟步甲科、鳃金龟科、鞘翅目幼虫、半翅目幼虫、瘿蚊科、夜蛾科、粪金龟科、长蜡科、蚁科和叶蜂科,共占捕获总量的 47.08%。而稀有类群共计 12 类,共占捕获总量的 4.03%。纲分类水平上,昆虫纲的类群数量和个体数最多,有 6 目 25 科,占到捕获总量的 83.62%。因此,从土壤动物种群数量和个数来看,昆虫纲为高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物的主要组成部分(表 2)。

表 2 高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物群落组成/个

Table 2 Compositions of soil macrofauna communities in the plots under different disturbance of plateau zokor

类群 Team	LD	MD	HD	ED	占比 Percent/%	优势度 Dominance
瓦娄蜗牛科 Valloniidae	37	67	36	41	15.44	+++
隐翅甲科 Staphylinidae	21	15	31	37	8.87	++
叩头甲科 Elateroidea	0	1	0	3	0.34	+
拟步甲科 Tenebrionidae	3	0	4	5	1.02	++
叶甲科 Chrysomelidae	5	2	1	5	1.11	++
鳃金龟科 Melolonthidae	9	9	2	7	2.30	++
小蠹科 Scolytidae	0	0	0	2	0.17	+
象甲科 Curculionidae	61	15	7	78	13.74	+++
鞘翅目幼虫 Coleoptera larva	22	4	0	11	3.16	++
蚜科 Aphididae	0	0	0	3	0.26	+
长蜡科 Lygaeidae Schilling	10	2	13	9	2.90	++
半翅目幼虫 Hemiptera larva	13	7	6	19	3.84	++
瘿蚊科 Cecidomyiidae	9	3	0	5	1.45	++
短角亚目幼虫 Brachycera larva	73	58	54	46	19.71	+++
沫蝉科 Cercopidae	0	0	0	1	0.09	+
夜蛾科 Noctuidae	12	8	10	12	3.58	++
螟蛾科 Pyralidae	1	1	0	0	0.17	+
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larva	0	0	0	1	0.09	+
地花蜂科 Andrenidae	0	0	1	0	0.09	+
叶蜂科 Tenthredinidae	3	2	3	5	1.11	++
茎蜂科 Cephidae	0	0	0	1	0.09	+
小蜂科 Chalcididae	0	1	0	0	0.09	+
姬蜂科 Ichneumonidae	1	0	1	2	0.34	+
虻科 Tabanidae	0	4	0	4	0.68	+
食虫虻科 Asilidae	1	0	3	5	0.77	+
食蚜蝇科 Syrphidae	0	0	1	1	0.17	+
地蛛科 Atypidae	2	0	2	3	0.60	+
地蜈蚣科 Geophilidae	0	0	0	1	0.09	+
步甲科 Carabidae	21	7	9	13	4.27	++
埋葬甲科 Silphidae	1	3	0	8	1.02	++
粪金龟科 Geotrupidae	15	55	3	27	8.53	++
蚁科 Formicidae	0	5	0	41	3.92	++

“+++”为优势类群,占总个体数 10%以上;“++”为常见类群,占总个体数 1%—10%;“+”为稀有类群,占总个体数 1%以下

## 2.2 高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物类群多样性变化

高原鼯鼠不同强度干扰区大型土壤动物类群多样性呈现出一定差异(图1)。其中物种丰富度变化总体呈先下降后上升总体趋势,表现为极重度(ED)干扰区物种丰富度显著高于重度(HD)、中度(MD)和轻度(LD)干扰区( $P < 0.05$ )。均匀度指数在不同强度高原鼯鼠干扰区无显著性差异变化。Shannon 指数是物种丰富度和均匀度综合表现,它的变化趋势同物种丰富度和丰度趋势变化相同,表现为极重度(ED)干扰区 Shannon 指数和丰度显著高于重度(HD)干扰区( $P < 0.05$ ),但与轻度(LD)和中度(MD)干扰区 Shannon 指数和丰度差异不明显( $P > 0.05$ )。

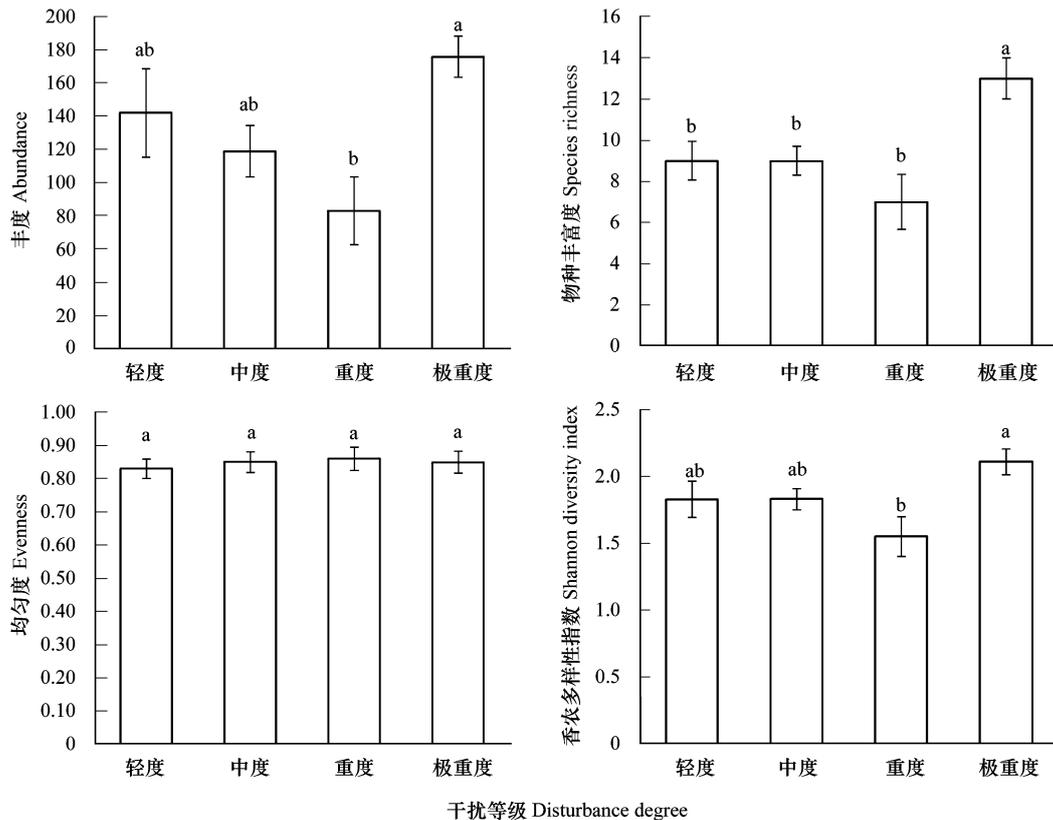


图1 高原鼯鼠干扰下大型土壤动物群落多样性比较

Fig.1 The comparison of soil macrofauna community diversity under the plateau zokor disturbance

LD: 轻度干扰, Lightly disturbance; MD: 中度干扰, Moderately disturbance; HD: 重度干扰, Heavily disturbance; ED: 极重度干扰, Extremely disturbance

## 2.3 高原鼯鼠干扰下大型土壤动物类群多样性与环境因子的关系

大型土壤动物类群多样性与土壤因子的相关分析结果表明(图2)。大型土壤动物的 Shannon 指数(A)与土壤全氮(TN)和土壤温度(ST)呈显著负相关( $P < 0.05$ );均匀度指数(B)与土壤有机质(TOC)呈显著负相关( $P < 0.05$ );丰富度指数(C)与土壤温度(ST)和土壤含水量(WC)呈显著负相关( $P < 0.01$ );丰度指数(D)与土壤紧实度(SC)和土壤温度(ST)呈显著负相关( $P < 0.05$ )。总体来看大型土壤动物多样性与土壤物理性状(土壤温度、含水量和紧实度)紧密相关,与其它土壤因子相关性较弱。

大型土壤动物类群多样性与植物因子的相关分析结果表明(图3)。大型土壤动物 Shannon 指数(A)与植物 Shannon 指数(Sh)呈显著负相关( $P < 0.01$ );丰富度指数(C)与植物 Shannon 指数(Sh)呈显著负相关( $P < 0.01$ );丰度指数(D)与植物群落高度(He)呈显著负相关( $P < 0.05$ )。总体来看大型土壤动物类群多样性与植物多样性指数(Shannon 指数)紧密相关,与其它植物因子相关性较弱。



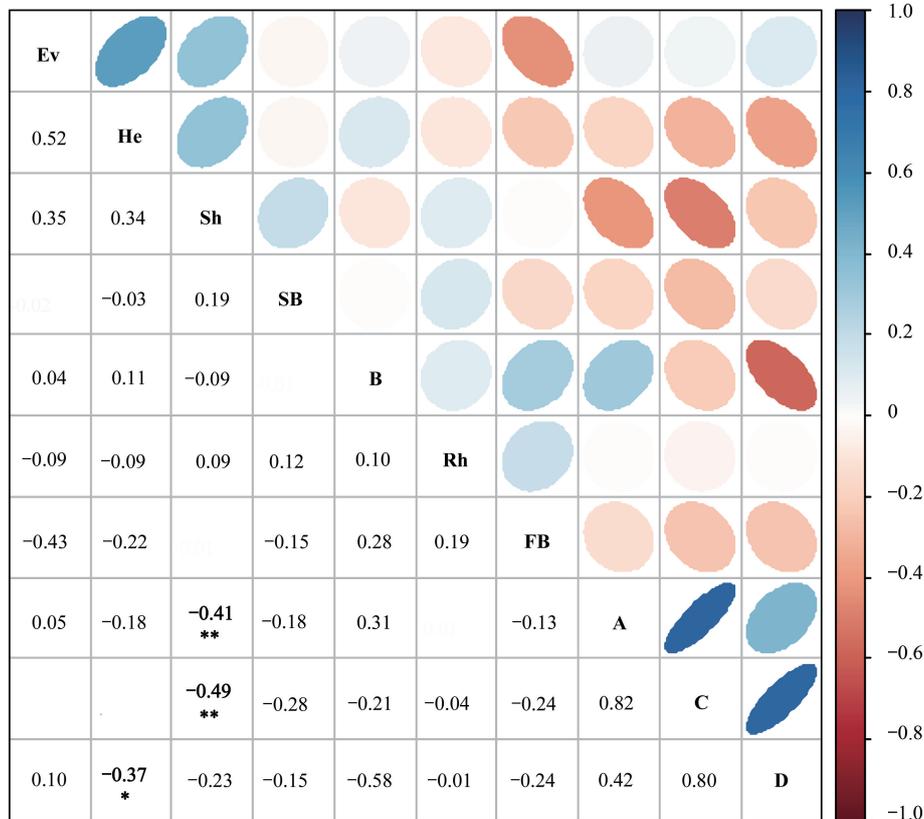


图3 大型土壤动物群落多样性与植物因子的相关性

Fig.3 The relationship between soil macrofauna community diversity and plant factors

A: 香农多样性指数 Shannon's Diversity Index; B: 均匀度指数 Evenness index; C: 丰富度指数 Richness index; D: 丰度指数 Abundance index; Ev: 植物均匀度指数 Plant Evenness index; Rh: 植物丰富度指数 Plant Richness index; Sh: 植物香农多样性指数 Shannon's Diversity Index; He: 植物群落高度 Plant community height; SB: 莎草类植物地上生物量 Sedge's above-ground biomass; FB: 杂类草植物地上生物量 Forb's above-ground biomass

胀系数 (Inflation factors, IFs) 均小于 10, 因此不受因子间自相关性影响。对土壤因子经 Monte Carlo 随机置换检验 999 次 (表 3), 结果表明 8 个独立的环境解释变量中, 土壤紧实度 (SC)、土壤含水量 (WC)、土壤温度 (ST) 和土壤全氮 (TN) 对大型土壤动物类群分布解释总效应达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 而其余因子对大型土壤动物类群分布解释的总效应未达到显著水平 ( $P > 0.05$ ), 土壤因子累计解释总效应达到 39.5%。除去协同变量影响, 土壤紧实度 (SC)、土壤含水量 (WC) 和土壤有机质 (TOC) 对大型土壤动物类群分布解释净效应达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 其余因子对解释变量净效应均无显著影响 ( $P > 0.05$ ), 土壤因子累计解释净效应达到 31.4%。

对植物因子经 Monte Carlo 随机置换检验 999 次 (表 3), 结果表明 6 个独立的环境解释变量中, 植物群落高度 (He) 对大型土壤动物类群分布解释总效应达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 而其余因子对大型土壤动物类群分布解释的总效应未达到显著水平 ( $P > 0.05$ ), 植物因子累计解释总效应达到 26.6%。除去协同变量影响, 植物群落高度 (He)、莎草类植物地上生物量 (SB) 和均匀度 (Ev) 对大型土壤动物类群分布解释净效应达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 植物因子累计解释净效应达到 28.3%。综合分析表明土壤因子 (土壤物理因子 21.7%) 对大型土壤动物类群分布解释贡献大于植物因子 (6.3%)。

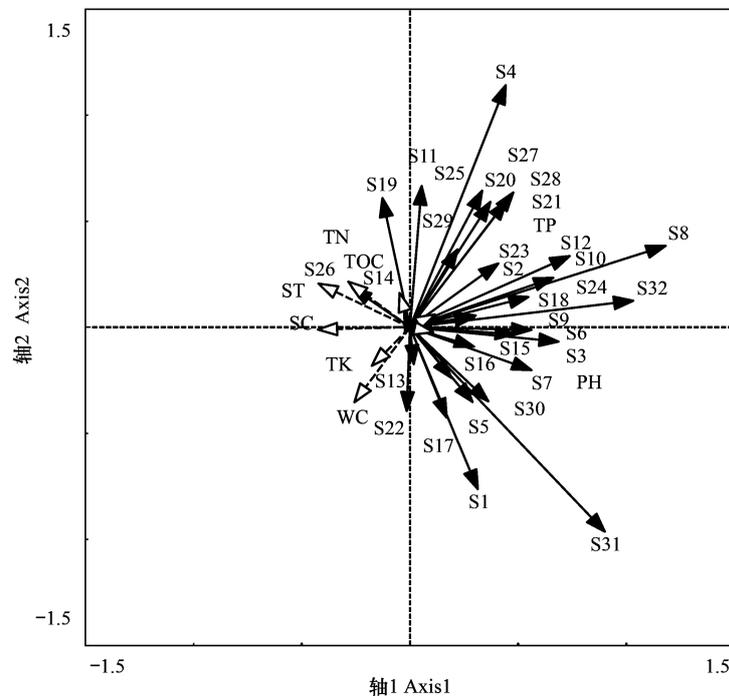


图 4 大型土壤动物类群与土壤因子排序

Fig.4 RDA biplot between soil factors and soil macrofauna communities

S1:瓦娄蜗牛科 Valloniidae; S2:隐翅甲科 Staphylinidae; S3:叩头甲科 Elateroidea; S4:拟步甲科 Tenebrionidae; S5:叶甲科 Chrysomelidae; S6:鳃金龟科 Melolonthidae; S7:小蠹科 Scolytidae; S8:象甲科 Curculionidae; S9:鞘翅目幼虫 Coleoptera larva; S10:蚜科 Aphididae; S11:长蝽科 Lygaeidae Schilling; S12:半翅目幼虫 Hemiptera larva; S13:瘦蚊科 Cecidomyiidae; S14:短角亚目幼虫 Brachycera larva; S15:沫蝉科 Cercopidae; S16:夜蛾科 Noctuidae; S17:螟蛾科 Pyralidae; S18:鳞翅目幼虫 Lepidoptera larva; S19:地花蜂科 Andrenidae; S20:叶蜂科 Tenthredinidae; S21:茎蜂科 Cephidae; S22:小蜂科 Chalcididae; S23:姬蜂科 Ichneumonidae; S24:虻科 Tabanidae; S25:食虫虻科 Asilidae; S26:食蚜蝇科 Syrphidae; S27:地蛛科 Atypidae; S28:地蜈蚣科 Geophilidae; S29:步甲科 Carabidae; S30:埋葬甲科 Silphidae; S31:粪金龟科 Geotrupidae; S32:蚁科 Formicidae

表 3 环境因子对大型土壤动物类群组成影响解释的总效应和净效应

Table 3 Gross and net effects of environmental variables on soil macrofauna communities

环境因子 Envirment factor	总效应/% Gross effect	F	净效应/% Net effect	F
TOC	3.9	1.369	4.5	1.834 *
TN	5.1	1.833 *	3.4	1.406
TP	2.2	0.758	2.8	1.129
TK	4.3	1.529	3.3	1.348
pH	2.3	0.805	2.2	0.914
WC	6.4	2.320 **	5.9	2.431 **
SC	7.2	2.652 **	4.1	1.658 *
ST	8.1	3.002 **	5.2	2.118 *
He	6.3	2.004 *	7.0	2.446 **
SB	4.6	1.452	5.1	1.770 *
FB	3.5	1.098	3.3	1.146
Rh	2.7	0.834	3.4	1.193
Ev	4.9	1.543	5.5	1.925 *
Sh	4.9	1.547	4.0	1.409

\* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; TOC: 土壤有机质, Soil organic matter; TN: 土壤全氮, Soil total N; SC: 土壤紧实度, Soil compaction; ST: 土壤温度, Soil temperature; WC: 土壤含水量, Soil moisture content; TK: 土壤全钾, Soil total K; pH: 土壤 pH; TP: 土壤全磷, Soil total P; He: 植物群落高度, Plant community height; SB: 莎草类植物地上生物量, Sedge's above-ground biomass; FB: 杂类草植物地上生物量, Forb's above-ground biomass; Rh: 植物丰富度指数, Plant Richness index; Ev: 植物均匀度指数, Plant Evenness index; Sh: 植物香农多样性指数, Shannon's Diversity Index

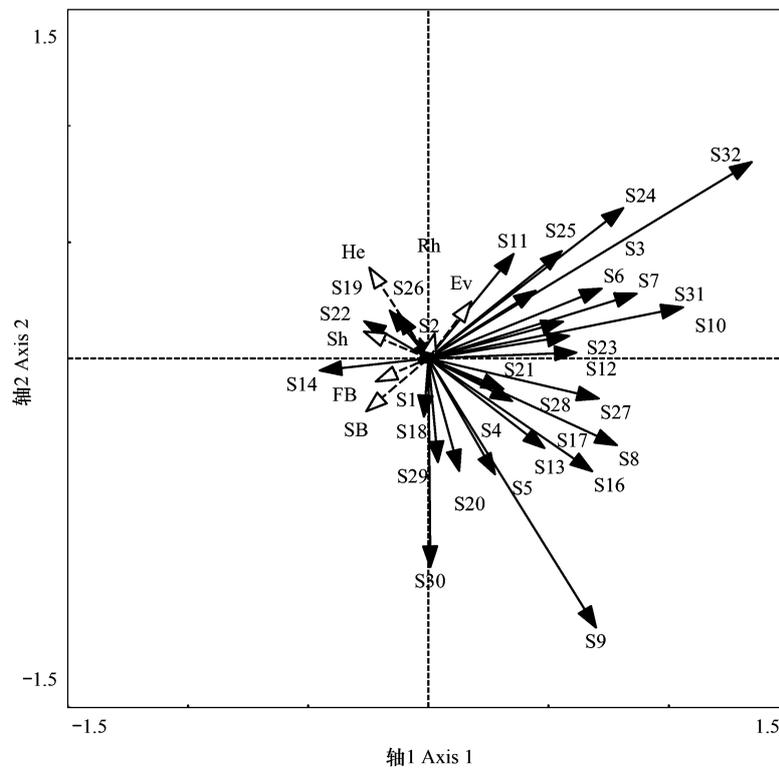


图 5 大型土壤动物类群与植物因子排序

Fig.5 RDA biplot between plant factors and soil macrofauna communities

### 3 讨论

#### 3.1 高原鼢鼠干扰下植被因子对高寒草甸大型土壤动物类群多样性影响

地下生物以及生态系统的功能和稳定性受地上过程的影响<sup>[18]</sup>,在草地生态系统中,植物多样性以及土壤理化性质变化均会影响土壤动物群落的组成和结构<sup>[6-7]</sup>。高原鼢鼠属于终年营地下生活鼠类<sup>[19]</sup>,其特殊生活习性对草地生态系统扰动效应比较复杂。一方面,高原鼢鼠通过采食挖掘活动直接改变植物物种组成和土壤结构<sup>[11-12]</sup>,加速土壤营养物质矿化分解;另一方面,其推土造丘活动形成的微地形改变了局域尺度下草地水热格局,从而对土壤-植被界面造成间接影响。本研究结果显示,高原鼢鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物类群多样性与植物多样性和地上生物量相关性较弱。同样 Hedlund<sup>[20]</sup>等研究认为,植物物种多样性和初级生产力梯度变化对土壤动物数量影响差异不明显。而吴鹏飞<sup>[6]</sup>研究表明,退化高寒草甸大型土壤动物类群多样性与生物量和植物种类存在显著相关关系。由于植物组成变化可以改变生物量质量、凋落物的性质和根系分泌物<sup>[21-22]</sup>,且多数研究表明草地植物群落的物种组可以影响土壤动物群落组成和结构<sup>[23-25]</sup>,因而退化高寒草甸植被物种多样性变化造成地上地下物质输入以及根系分泌物不同进而影响土壤动物多样性。但部分学者利用同位素标记法研究发现土壤动物主要依靠根系而不是凋落物的碳<sup>[26-27]</sup>,这就表明根系资源多元化对土壤动物多样性影响较大。本研究中高原鼢鼠干扰下鼠丘间植被多样性和地上生物量变化差异均较小,且以莎草类植物占据优势的高寒草甸其草毡层根系资源单一,从而造成高寒草甸植物多样性和生产力对大型土壤动物组成影响较小,大型土壤动物多样性与植物多样性相关性弱。其次,植物影响土壤动物的机制主要包括选择效应和互补效应<sup>[28]</sup>。在本研究中,由于大型土壤动物自身较强的扩散能力,以及食性生态位分化(植食性、捕食性、腐生性和杂食性)使得大型土壤动物类群受植物多样性和生产力的限制较少,而小型土壤动物如弹尾目、甲螨及线虫类群多样性与植物多样性呈正相关<sup>[29]</sup>,其类群多样性明显受限于自身扩散能力与食性特化

限制。因此,大型土壤动物种群调控机制也是其多样性受植物环境因子影响较小的部分原因。综合以上表明,由于高寒草甸草毡层根系资源的限制以及大型土壤动物自身较强的拓殖-竞争能力使其多样性与植物因子相关性较小。

### 3.2 高原鼯鼠干扰下土壤因子对高寒草甸大型土壤动物类群多样性影响

生境土壤因子变化会造成土壤动物类群在空间尺度上的差异性分布<sup>[30]</sup>。高原鼯鼠造丘活动也会造成局域小生境水热条件改变。而土壤结构和营养状况与土壤动物类群数量和组成又紧密相关<sup>[7,31]</sup>。本研究中,土壤动物类群多样性随高原鼯鼠干扰强度增大总体呈上升趋势(重度干扰区除外),各干扰区土壤化学性状(土壤有机质和全钾含量)差异较小,但土壤物理性状(土壤紧实度和温度)在高原鼯鼠干扰下存在明显差异。李岳诚<sup>[32]</sup>利用冗余和偏冗余分析方法发现土壤温度、含水量、土壤有机碳和全氮是影响土壤动物多样性的主要因子。刘继亮<sup>[30]</sup>研究表明,土壤温度与土壤动物类群分布呈显著负相关,其余土壤因子(含水率、有机质和全氮)与大型土壤动物类群分布也紧密相关。本研究中高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物类群多样性与土壤温度、含水量、紧实度、土壤有机质以及全氮相关,且大型土壤动物类群分布与土壤因子相关,进一步分析土壤因子对土壤动物类群空间分布影响发现,土壤温度、紧实度、含水量和全氮对土壤动物类群分布有显著影响,累计解释总效应贡献达到 26.8%。其中,土壤物理因子解释贡献 21.7%,土壤化学因子 5.1%,表明相比土壤化学性状土壤物理性状对高寒草甸大型土壤动物类群组成和分布影响较大。一方面,青藏高原地理环境特殊,土壤温度终年偏低,草甸表层植被的高持水性能使土壤温度和含水量成为限制土壤动物群落分布的主要环境因子。

另一方面,由于草甸致密草毡层影响造成表层土壤结构紧实限制了大型土壤动物扩散繁殖,从而影响大型土壤动物丰度和多样性。因而,相比森林和农田生态系统,高寒草甸大型土壤动物类群数量和丰度明显较低<sup>[33]</sup>。同样,吴鹏飞<sup>[6]</sup>研究高寒草甸退化大型土壤动物结果表明大型土壤动物类群数和多样性与土壤容重呈负相关,而高原鼯鼠掘洞推土形成的复杂洞道系统破坏了致密草毡层明显降低表层土壤紧实度<sup>[34]</sup>,从而有利于大型土壤动物的栖息与繁殖。因此,研究区极重度干扰梯度下大型土壤动物多样性明显高于重度干扰。另外,由于本研究重度干扰区受牧道变迁影响成为高原鼯鼠扩散新区域,家畜践踏使其土壤紧实度显著高于极重度和中度干扰区。总之,高原鼯鼠干扰对丘间土壤物理性状影响较大,使得高寒草甸大型土壤动物类群多样性主要受土壤物理性状影响。环境因子制约以及土壤动物群落竞争机制综合影响明显提高了大型土壤动物对高寒草甸生态系统的环境适应程度,从而影响局域尺度上大型土壤动物物种组成和多样性。

## 4 结论

本研究中,采集到大型土壤动物标本分属 9 目 28 科,其中柄眼目瓦娄蜗牛科、鞘翅目象甲科和双翅目短角亚目幼虫为高寒草甸主要优势类群。高原鼯鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物多样性与土壤理化性状相关性较高,而与植物多样性和生物量相关性较小。冗余分析表明土壤温度、土壤含水量和紧实度是影响高寒草甸大型土壤动物组成和分布的主要环境因子。青藏高原生境的特殊性以及土壤动物对微生境改变响应存在迟滞效应,要想揭示高寒草甸土壤动物多样性对环境因子的响应机理,还需要开展长期野外定点监测和多因子综合控制实验。

### 参考文献 (References):

- [1] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804-808.
- [2] 董炜华, 李晓强, 宋扬. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用. *土壤*, 2016, 48(2): 211-218.
- [3] Seastedt T R. The role of Microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Annual Review of Entomology*, 1984, 29: 25-46.
- [4] 张志罡, 孙继英, 胡波, 颜亨梅. 土壤动物研究综述. *生命科学研究*, 2006, 10(4): 72-75.
- [5] 刘霞, 赵东, 程建伟, 陈海燕, 刘新民, 宝音陶格涛, 李永宏. 放牧和刘割对内蒙古典型草原大型土壤动物的影响. *应用生态学报*, 2017,

- 28(6): 1869-1878.
- [ 6 ] 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽巍, 钟红梅, 王永. 大型土壤动物群落对高寒草甸退化的响应. 土壤学报, 2013, 50(4): 786-799.
- [ 7 ] 张洪芝, 吴鹏飞, 崔丽巍. 高寒草甸大型土壤动物群落结构特征及其与环境的关系. 土壤学报, 2012, 49(6): 1267-1273.
- [ 8 ] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 于云江. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估. 生态学报, 2004, 24(12): 2749-2755.
- [ 9 ] 韦惠兰, 郭达. 玛曲高寒草甸生态系统的动态变化及其驱动力. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1413-1420.
- [ 10 ] 张目, 朱国亮. 青藏高原高寒草地生态系统严重退化. 草业科学, 2004, 21(2): 56-56.
- [ 11 ] 宗文杰, 江小雷, 严林. 高原鼯鼠的干扰对高寒草地植物群落物种多样性的影响. 草业科学, 2006, 23(10): 68-72.
- [ 12 ] 鲍根生, 王宏生, 王玉琴, 曾辉, 马戈亮, 洛藏昂毛. 高原鼯鼠造丘活动对高寒草地土壤养分空间异质性的影响. 草业学报, 2016, 25(7): 95-103.
- [ 13 ] 楚彬, 花立民, 周延山, 刘丽, 李帅. 祁连山东段不同放牧强度下高原鼯鼠栖息地选择分析. 草业学报, 2016, 25(1): 179-186.
- [ 14 ] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998: 393-701.
- [ 15 ] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 271-393.
- [ 16 ] ter Braak C J F, Šmilauer P. CANOCO Reference Manual and User's Guide to CANOCO for Windows; Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Ithaca, NY: Microcomputer Power, 2002.
- [ 17 ] Lososová Z, Chytrý M, Cimalová S, Kropáč Z, Otýpková Z, Pyšek P, Tichý L. Weed vegetation of arable land in central Europe: gradients of diversity and species composition. Journal of Vegetation Science, 2004, 15(3): 415-422.
- [ 18 ] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, Van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. Science, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [ 19 ] 戴月琴. 甘肃鼯鼠(*Myospalax cansus*)的视器结构及辨色能力研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
- [ 20 ] Hedlund K, Santa Regina I, Van der Putten W H, Lepš J, Díaz T, Korhals G W, Lavorel S, Brown V K, Gormsen D, Mortimer S R, Rodríguez Barrueco C, Roy J, Smilauer P, Smilauerová M, Van Dijk C. Plant species diversity, plant biomass and responses of the soil community on abandoned land across Europe: idiosyncrasy or above-belowground time lags. Oikos, 2003, 103(1): 45-58.
- [ 21 ] Srivastava D S, Cardinale B J, Downing A L, Duffy J E, Jouseau C, Sankaran M, Wright J P. Diversity has stronger top-down than bottom-up effects on decomposition. Ecology, 2009, 90(4): 1073-1083.
- [ 22 ] Eisenhauer N, Hörsch V, Moeser J, Scheu S. Synergistic effects of microbial and animal decomposers on plant and herbivore performance. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(1): 23-34.
- [ 23 ] Hemerik L, Brussaard L. Diversity of soil macro-invertebrates in grasslands under restoration succession. European Journal of Soil Biology, 2002, 38(2): 145-150.
- [ 24 ] 邵珍珍, 吴鹏飞. 小型表栖节肢动物群落对高寒湿地退化的响应. 生态学报, 2019, 39(19): 6990-7001.
- [ 25 ] 李雨, 吴鹏飞, 龙伟, 马金豪. 高寒地区种植不同种类牧草对土壤节肢动物群落的影响. 生态学报, 2019, 39(20): 7697-7708.
- [ 26 ] Scheunemann N, Digel C, Scheu S, Butenschon O. Roots rather than shoot residues drive soil arthropod communities of arable fields. Oecologia, 2015, 179(4): 1135-1145.
- [ 27 ] Eissfeller V, Beyer F, Valtanen K, Hertel D, Maraun M, Polle A, Scheu S. Incorporation of plant carbon and microbial nitrogen into the rhizosphere food web of beech and ash. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 62: 76-81.
- [ 28 ] 严珺, 吴纪华. 植物多样性对土壤动物影响的研究进展. 土壤, 2018, 50(2): 231-238.
- [ 29 ] Eisenhauer N, Milcu A, Sabais A C W, Bessler H, Brenner J, Engels C, Klärner B, Maraun M, Partsch S, Roscher C, Schonert F, Temperton V M, Thomisch K, Weigelt A, Weisser W W, Scheu S. Plant diversity surpasses plant functional groups and plant productivity as driver of soil biota in the long term. PLoS One, 2011, 6(1): e16055.
- [ 30 ] 刘继亮, 殷秀琴, 邱丽丽. 左家自然保护区大型土壤动物与土壤因子关系研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 130-136.
- [ 31 ] 路凯亮, 滕悦, 李俊兰. 围封对内蒙古退化典型草原大型土壤动物群落多样性的影响. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2680-2689.
- [ 32 ] 李岳诚. 宁夏荒漠草原沙蒿群丛生境土壤节肢动物多样性及沙蒿金叶甲种群生态学研究[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2015.
- [ 33 ] 殷秀琴, 宋博, 董伟华, 辛未冬. 我国土壤动物生态地理研究进展. 地理学报, 2010, 65(1): 91-102.
- [ 34 ] 周延山, 花立民, 楚彬, 刘丽, 姬程鹏, 田永亮. 高原鼯鼠繁殖特性与其栖息草地质量的关系. 兽类学报, 2017, 37(1): 87-96.